

基于光学干涉技术的 MEMS 薄膜泊松比 在线测量方法研究

赵彩峰, 戎 华

(南京师范大学 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210097)

[摘要] 提出了一种基于光学干涉技术的 MEMS 薄膜泊松比在线测量方法. 该方法采用直角悬臂梁作为测试结构, 在上下两电极之间加上电压后, 在静电力的作用下, 与锚区相连的第一段直梁将发生弯曲变形和扭转变形. 先由米劳干涉仪测得悬臂梁的变形, 然后分离出变形中的弯曲分量和扭转分量, 进而计算出薄膜材料的泊松比. 用 CoventorWare 软件验证. 结果显示该方法精度很高.

[关键词] MEMS 薄膜, 泊松比, 在线测量, 直角悬臂梁

[中图分类号] TN 401 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)01-0089-04

Study of the Optical Interference Technique for the Measurement of the Poisson's Ratio of MEMS Thin Films

Zhao Caifeng Rong Hua

(Jiangsu Province Optoelectronics Technique Key Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract In this study, a method to measure the Poisson's ratio of thin MEMS film according to optical interference technical is proposed. The method makes use of a right angle cantilever beam as test structure; applies voltage between the top electrode and the bottom electrode; under the function of the electrostatic force, the first part of the cantilever beam which is connected with the anchor will become deformed with bending and torsion. First, measure the deformation with Miao interference instrument; then separate the bending and torsion, figure out the Poisson's ratio of thin MEMS film, and verify the method with the software of CoventorWare. The results show that the accuracy of the method is very high.

Key words thin MEMS film, Poisson's ratio, in situ measurement, right angle cantilever beam

MEMS 薄膜在微机电系统中被广泛使用. 薄膜力学性能对器件性能影响很大, 尤其是制作可动部件的结构层薄膜的性能对 MEMS 器件制作的成败及性能的好坏影响至关重要. MEMS 薄膜的力学参数主要包括泊松比、弹性模量、残余应力及沿厚度方向的应力梯度等. 薄膜的这些力学参数与宏观大体积同种材料的参数会有很大差异, 不能把宏观大体积材料的力学参数等同于 MEMS 薄膜的力学参数. 而且这些力学参数也会随着加工工艺条件 (例如温度、反应气体压力等) 的改变而改变, 因而需要在工艺线上经常测量 (在线测量), 以获得某一特定工艺条件下的材料参数或检测工艺的稳定性. 在线测量必须简便、准确、占用芯片面积小、无破坏性, 无法采用测量宏观大体积材料力学参数的方法进行测量. 因此研究适用于 MEMS 实际加工过程的薄膜力学参数的在线测量方法就成为该领域的一项迫切需要. 本文研究了 MEMS 薄膜泊松比的在线测量.

目前在线测量 MEMS 薄膜泊松比的方法主要有以下几种:

(1) 扭转法^[1]: 在结构层上制作两个相连的圆环, 锚区在左右两边, 释放后, 在两个圆环相连处用纳米压痕计施加压力, 两环相连处产生向下的位移. 推导出圆环相连处的位移、压力、泊松比、杨氏模量之间

收稿日期: 2009-12-04
基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2006223)、东南大学 MEMS 教育部重点实验室开放项目基金.
通讯联系人: 戎 华, 博士, 副教授, 研究方向: 微机电系统 (MEMS) 设计. E-mail: ronghua_1963@263.net

的理论关系式,用纳米压痕计测出两环相连处的位移与所加压力之间的真实关系,即可算出材料的泊松比. 该方法的最大特点是圆环的变形中包含弯曲分量和扭转分量. 其局限性在于:要测量泊松比,必须预先知道材料的杨氏模量,这样就会影响泊松比的测量精度.

(2) 谐振频率法^[2]:制作一组悬臂梁,杨氏模量与梁的弯曲谐振频率的平方成正比,切变模量与梁的扭转谐振频率的平方成正比.用多普勒仪测出悬臂梁的弯曲谐振频率和扭转谐振频率后,就可以得到泊松比.该方法要求真空环境,操作较麻烦.

(3) 拉伸法^[3]:制作一组悬臂梁结构,首先通过 PZT 器件对梁的两端直接施加拉力,然后用原子力显微镜测出梁拉伸后的散斑图像,就可以得出外力变化引起的横向及纵向变形,从而得到泊松比.该方法是基于泊松比定义的直接测量,精度很高,但操作复杂,且需要原子力显微镜等昂贵设备,不适用于在线测量.

本文提出的基于光学干涉技术的 MEMS 薄膜泊松比在线测量方法是采用直角悬臂梁作为测试结构(如图 1 所示),梁的材料为多晶硅.本方法最大的优点是无需预先知道薄膜杨氏模量的具体值,保证了泊松比的测量精度.此外,本方法属于非接触的光学测量方法,不会对测量结构造成损害,重复性好,多次测量造成的静电积累也不会影响最终结果.本方法还具有占用芯片面积小、测量简便等优点,非常适合在线测量 MEMS 薄膜材料的泊松比.

1 结构模型及理论分析

制作两个相对锚区中心对称的直角悬臂梁作为测试结构.制作对称的两个直角悬臂梁目的在于使锚区接近理想固支,可以只分析其中的一个悬臂梁.梁的材料为多晶硅,在梁的末端及其正下方的基底上制作正方形电极(如图 1 所示),锚区以下的电极和引线采用铜制材料,锚区以上的电极和引线采用铝制材料.为了减少铝引线对测量精度的影响,引线对梁来说要很细.因为上电极离下电极很近,而梁上面的引线离下电极较远,所以可以只考虑两电极所带的电荷,其他部位所带的电荷忽略不计,而不会影响测量结果.每段梁的长度均为 L ,宽度均为 a (如图 2 所示).

在上下电极之间加上电压 U 后,两个相对锚区中心对称的直角悬臂梁就会发生相对锚区中心对称的变形,这样就使锚区更接近理想固支.以图 2 中右边的直角悬臂梁为例,当上下电极之间加上电压 U 后,下电极就会对上电极产生静电引力 F 的作用,它的作用点在上电极下表面的几何中心处.该力 F 对与锚区相连的第一段直梁来说有两个作用效果,分别为弯曲和扭转.下文的讨论均为针对该段直梁而言的.以下分别算出各截面处弯曲的挠度和扭转的角度.

1.1 挠度的计算

力 F 在各截面处产生的弯矩为:

$$M(x) = F\left[L - x + \frac{1}{2}a\right]. \tag{1}$$

由弯矩计算挠度的公式:

$$EI\omega' = \int M(x) \, dx + c_1, \tag{2}$$

$$EI\omega = \left[\int M(x) \, dx\right] \, dx + c_1x + c_2. \tag{3}$$

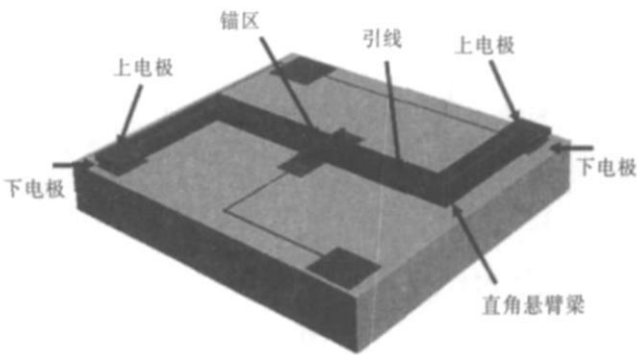


图 1 测试结构示意图

Fig.1 Schematic of the test structure

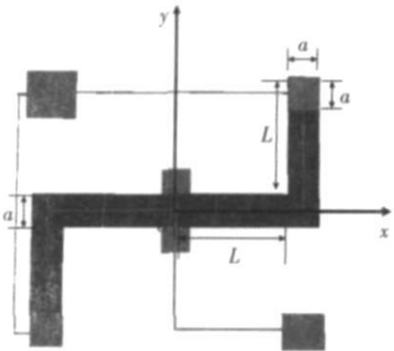


图 2 测试结构俯视图

Fig.2 Top view of the test structure

式中, ω 为挠度, c_1 、 c_2 为任意常数, E 为杨氏模量, I 为横截面对中性轴的惯性矩.

把式 (1) 代入式 (2)、式 (3), 并根据边界条件: $x = 0$ 时, $\omega = \omega' = 0$ 可得:

$$\omega = \frac{F}{12EI} [(6L + 3a)x^2 - 2x^3]. \tag{4}$$

1.2 扭转角度的计算

力 F 对梁产生的扭矩为:

$$T = F \cdot L. \tag{5}$$

单位长度扭转角的计算公式为:

$$\varphi = \frac{T}{GI_t}. \tag{6}$$

式中, $I_t = \frac{1}{3}ah^3$, φ 为扭转角, G 为材料的切变模量, h 为梁的厚度. 由式 (5)、式 (6) 可得梁的扭转角为:

$$\varphi = \frac{3FL}{ah^3G}x. \tag{7}$$

式 (4) 除以式 (7), 并把 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, $I = \frac{1}{12}ah^3$, 代入并整理后可得泊松比 ν 为:

$$\nu = \frac{[(6L + 3a)x - 2x^2] \varphi}{6\omega L} - 1. \tag{8}$$

实验时用精度很高的米劳干涉仪测量出 x 截面处的挠度 ω 和转角 φ , 代入式 (8), 即可得到材料的泊松比, 而不必预先知道材料的杨氏模量, 保证了结果的精度. 同时, 静电力 F 在运算中消去, 所以无需准确知道上下电极间所加的电压, 简化了实验步骤.

2 CoventorWare 仿真验证

为了验证上述理论的正确性, 以 CoventorWare 软件对其进行验证. 在软件中设定多晶硅的泊松比为 $\nu = 0.22$ 用 CoventorWare 软件按照牺牲层工艺模拟生成直角悬臂梁的三维立体模型图如图 1 所示. 其中, $L = 142 \mu\text{m}$, $a = 36 \mu\text{m}$, 梁的厚度 $h = 2 \mu\text{m}$, 梁上面的铝引线的厚度为 $2 \mu\text{m}$, 宽度为 $2 \mu\text{m}$, 位于梁的中心线上. 用 Manhattan bricks 型网格对三维立体模型进行网格划分, 结果如图 3 所示.

依次对上下电极之间加 $U = 15\ 20\ 25\ 30\text{V}$ 的电压, 与锚区相连的第一段直梁就会在静电力的作用下依次发生弯曲变形和扭转变形, 仿真结果的三维立体图如图 4 所示.

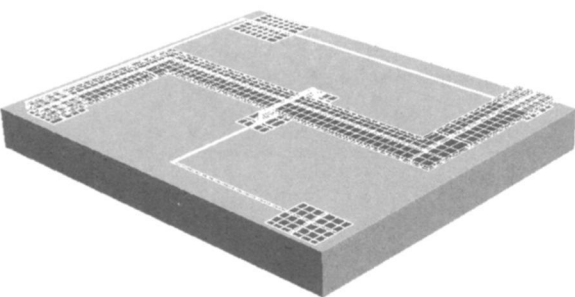


图 3 用 Manhattan bricks 型网格单元划分的 3-D 立体模型
Fig.3 The Three-dimensional model divided with Manhattan bricks grid

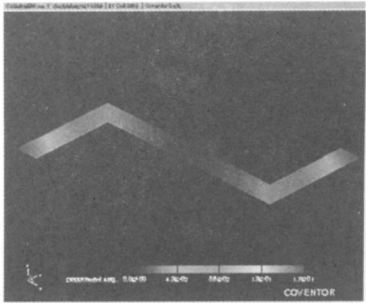


图 4 $U=20\text{ V}$ 时仿真结果的三维立体图
Fig.4 When $U=20\text{ V}$, the three-dimensional map of the simulation results

由式 (8) 可知, 测量与锚区相连的第一段直梁的任意截面处的弯曲分量 ω 和扭转分量 φ 都可以求出材料的泊松比, 但是考虑到与锚区相连的第一段直梁末端附近形变量大, 易于测量, 所以选择靠近末端测量, 即式 (8) 中不妨取 $x = 140 \mu\text{m}$. 为了要分离出变形中的弯曲分量和扭转分量, 可以采用如图 5 所示的方法分离.

图 5 中, ω_1 、 ω_2 分别为横截面两端点下降的距离, ω_0 为横截面中间点下降的距离, 则 ω_0 就代表该截

面的挠度, 即 $\omega = \omega_0$, 而 $\frac{\omega_2 - \omega_1}{a}$ 就为该截面处的扭转角, 即 $\varphi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{a}$. 实验时, 可以只测量 ω_1 、 ω_2 , 而 $\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. CoventorWare 仿真数据如表 1 所示.

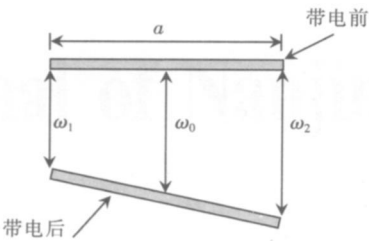


图 5 $x=L$ 处截面带电前后示意图
Fig.5 Schematic before and after charged of the $x=L$ cross-section

表 1 仿真数据及结果

Table 1 The data and results obtained from simulation				
U/V	15	20	25	30
$\omega_1/\mu\text{m}$	0.0325726	0.0579084	0.0904862	0.1303071
$\omega_2/\mu\text{m}$	0.0485349	0.0862862	0.1348270	0.1941580
$\omega_0/\mu\text{m}$	0.0405538	0.0720973	0.1126566	0.1622325
ν	0.22169	0.22167	0.22164	0.22159
相对误差 $\frac{\nu - \nu_0}{\nu} \%$	0.762	0.753	0.740	0.718

注: $\nu_0 = 0.22$ 为 CoventorWare 软件中设置的泊松比.

3 结语

通过 CoventorWare 软件仿真数据可知, 本文所提出的理论和方法是正确的, 并且精度较高. 该方法的优点如下:

- (1) 用对称的直角悬臂梁作为测试结构, 使锚区更加接近理想固支.
- (2) 无需预先知道薄膜杨氏模量的具体值, 避免了因杨氏模量而引起的误差, 有利于精度的提高.
- (3) 可以从整个第一段直梁的变形数据来计算泊松比, 避免偶然误差.
- (4) 采用光学干涉技术测量形变数据, 提高了形变数据测量的精度, 使得该方法可以用于纳米薄膜的测量. 米劳干涉仪操作简便, 可以一次测量出其视场范围内的一组测试结构的形变, 测量效率高, 适合在线测量.

本方法属于非接触式测量, 测量过程不会对测试结构产生影响, 可以保证测量的重复性. 同时测量过程中产生的静电积累不会对最终结果产生影响. 且无需知道电压的准确值, 简化了实验步骤. 对于导体和非导体, 本方法都适用.

[参考文献] (References)

[1] Kim Jonghoon, Yeon Soonchang, Jeon Yunkwang, et al. Nano-indentation method for the measurement of the Poisson's ratio of MEMS thin films[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 10(8): 20-27

[2] Tsai Hsinchang, Fang Weikeun. Determining the Poisson's ratio of thin film materials using resonant method[J]. Sensors and Actuators A, 2003(6): 77-83

[3] Cho S W, Chasiotis I. Elastic properties and representative volume element of polycrystalline silicon for MEMS[J]. Experimental Mechanics DOI, 2006(3): 23-29.

[4] Baek Changwook, Kim Yongkwon, Ahn Yoonin, et al. Measurement of the mechanical properties of electroplated gold thin films using micromachined beam structures[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 11(7): 17-27

[5] Tang Yujie, Cheng Jing. Ultra-sensitive highly reproducible film stress characterization using flexible suspended thin silicon plates and local curvature measurements[J]. J Micromech Microeng, 2007, 17(1): 23-30

[6] Ding J N, Meng Y G, Wen S Z. Specimen size effect on mechanical properties of polysilicon microcantilever beams measured by deflection using a nanoindenter[J]. Mater Sci Eng B, 2001, 8(3): 42-47.

[7] Kim Jaehyun, Lee Hakjo, Choa Sunghoon. Research trends for mechanical characterization of MEMS materials in Korea: Research needs and new developments[J]. Transaction on Electrical and Electronic Engineering IEE Trans, 2008(3): 255-259

[责任编辑: 严海琳]